

短繊維補強コンクリートによる鉄道 RC ラーメン高架橋部材接合部の配筋合理化に関する研究

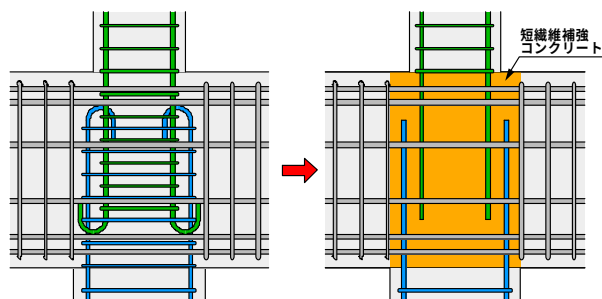
松林 卓・竹内 秀聡・原 夏生・三島 徹也

A RESEARCH ON SIMPLIFICATION OF THE ARRANGEMENT BAR OF RAILWAY RIGID-FRAME VIADUCT BY THE FIBER REINFORCEMENT CONCRETE

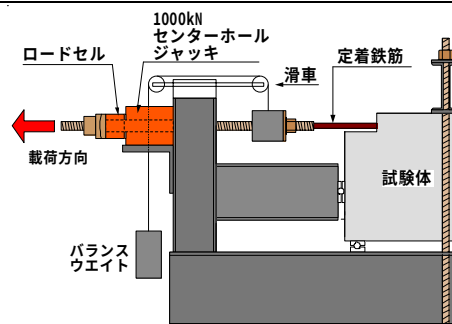
Taku MATSUBAYASHI, Hideaki Takeuchi, Natsuo HARA, Tetsuya MISHIMA



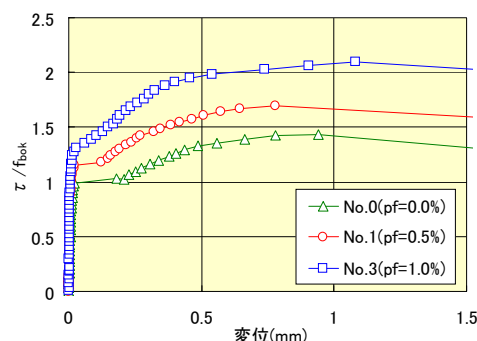
鉄道 RC ラーメン高架橋部材接合部の配筋例



短繊維補強コンクリートによる配筋の合理化



鉄筋の引き抜き実験



繊維混入の効果（付着強度の増加）

研究の目的

鉄道 RC ラーメン高架橋における柱・地中梁・杭の各部材が交差する接合部においては、各部材の鉄筋が輻輳するため、配筋作業が煩雑になるばかりでなく、コンクリートの確実な充填性についても注意が必要となるなど、所定の品質を確保するための課題が生じている。当社は既往の研究において、鋼繊維補強コンクリートを用いることによって接合部の配筋を簡略化できることを実験的に確認し、特許出願している。しかしながらデータ数の不足により実際の設計に反映するには至っていないのが現状である。そこで本研究は、短繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上効果を定量的に把握し、設計式に反映させることで、短繊維補強コンクリートによる配筋の簡略化を実設計に取り入れることを目的とする。

技術の説明

短繊維補強コンクリートを用いることにより、繊維がコンクリートの割裂ひび割れを抑制するとともに、スターラップ等の横方向鉄筋の付着力も向上させることから鉄筋の拘束力が向上する。このため、鉄筋の定着長を低減することが可能となり、鉄道 RC ラーメン高架橋の部材接合部等においては柱主鉄筋や杭頭鉄筋のフックや帯鉄筋を低減することができる。

主な結論

鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物に示されている鉄筋の基本定着長算定式に、短繊維補強効果を考慮した新しい基本定着長算定式の提案を行った。

短繊維補強コンクリートによる鉄道RCラーメン高架橋 部材接合部の配筋合理化に関する研究

松 林 卓 竹 内 秀 聡
原 夏 生 三 島 徹 也

要 旨

鉄道RCラーメン高架橋における柱・地中梁・杭の接合部では、各部材の鉄筋が輻輳するため、配筋の施工性が低下するばかりでなく、コンクリートの確実な充填性についても注意が必要となるなど、所定の品質を確保するための課題が生じている。当社は、既往の研究において、鋼繊維補強コンクリートを用いることによって接合部の配筋を簡略化できることを実験的に確認しているが、実構造物の設計法に反映するには至っていないのが現状である。

そこで本研究では、短繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上効果を定量的に把握するために、短繊維が影響すると考えられる要因をパラメータとした鉄筋の引き抜き実験を行った。そして、その実験結果から、鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物に示されている鉄筋の基本定着長算定式に短繊維補強効果を加えた新しい基本定着長算定式の提案を行った。

キーワード 鉄道RCラーメン高架橋／接合部／短繊維補強コンクリート／付着／基本定着長

目 次

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. はじめに | 4. 短繊維による補強効果の |
| 2. 鉄筋の引き抜き実験 | 定式化の検討 |
| 3. 短繊維による補強 | 5. 提案式の効果の確認 |
| メカニズムの検討 | 6. まとめと今後の課題 |

A RESEARCH ON SIMPLIFICATION OF THE ARRANGEMENT BAR OF RAILWAY RIGID-FRAME VIADUCT BY THE FIBER REINFORCEMENT CONCRETE

Taku MATSUBAYASHI Hideaki TAKEUCHI
Natsuo HARA Tetsuya MISHIMA

Synopsis:

Due to the congested reinforcement bars in the joint of column, underground beam and pier of railway rigid-frame viaduct, not only the assembly of reinforcement bars but the pouring of concrete is difficult. According to the past researches, the simplification of the arrangement bar in the joint was proved by the utilization of steel fiber reinforcement concrete. However, it was not reflected on the design of structure.

In this research, in order to realize quantitatively the steel bonding effect of fiber reinforced concrete, the pull-out test was executed by the consideration of fiber effect. Furthermore, the development-length equation of "Standards of railway structures-concrete structure" was proposed to be changed with the addition of fiber reinforcement effect based on the results of this research.

1. はじめに

兵庫県南部地震による被害を踏まえた耐震設計基準の強化以後、橋梁などの鉄筋コンクリート構造物においては、耐震性能向上のために鉄筋量が増加している。鉄道 RC ラーメン高架橋における柱・地中梁・杭の各部材が交差する接合部においても、鉄筋量の増加に伴って各部材の鉄筋が輻輳し、配筋の施工性を低下させている場合が多い。その一例を写真 1 に示す。通常、接合部内の配筋においては、杭部材の鉄筋定着部には内向きのフック、柱主鉄筋の定着部には外向きフックがつけられており、それぞれの帯鉄筋も存在する。さらに、同一接合部内に地中梁の配筋も入るため、配筋作業が煩雑なばかりでなく、コンクリートの確実な充填についても注意が必要となるなど、所定の品質を確保するための課題が生じている。既往の研究では、鋼繊維補強コンクリートを用いることによって、図 1 に示すように、フックや帯鉄筋を簡略化できることが実験的に確認されているが¹⁾、実構造物の設計法に反映するには至っていないのが現状である。

そこで本研究では、短繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上効果を定量的に把握するために、短繊維が影響すると考えられる要因をパラメータとした鉄筋の引き抜き実験を行った。また、その実験結果から、鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物²⁾に示されている鉄筋の基本定着長算定式に短繊維補強効果を加えた新しい基本定着長算定式を提案している。

2. 鉄筋の引き抜き実験

2.1 試験体および引き抜き実験の概要

実験は、複数鉄筋からなる柱部材の定着性能を評価することを考慮し、鉄筋コンクリート部材に埋め込まれた 4 本の鉄筋を同時に引き抜く実験を行うこととした。なお、試験体形状および載荷方法については藤井らにより行われている方法³⁾を参考とした。図 2 に試験体および計測位置を、図 3 に載荷装置を示す。試験体は、定着する鉄筋が鉄筋コンクリート部材に埋め込まれた形状をしており、載荷は、埋め込まれた定着鉄筋の反対側端部をナットで鋼材に定着し、2 本の PC 鋼棒を介して 2 つのジャッキで同時に引き抜くものである。

2.2 実験パラメータ

鉄筋の基本定着長の算定式は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾、鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾および道路橋示方書・同解説⁵⁾それぞれにおいて定められており、これらは、式の形状に若干の差異はあるものの、基本的な考え方はすべて同じである。ここに、鉄道構造物等設計標準・同解説に基づく鉄筋の基本定着長の算定式を式 (1) に示す。

$$l_d = \alpha_b \cdot \frac{f_{syd}}{4f_{bod}} \cdot \phi \quad (1)$$



写真 1 鉄道 RC ラーメン高架橋部材接合部の例

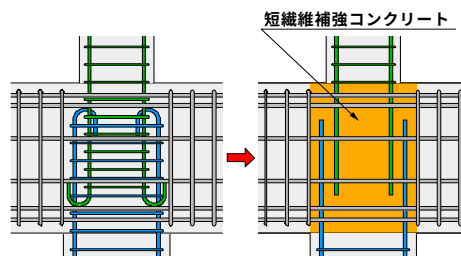


図 1 鋼繊維補強コンクリートによる配筋の合理化

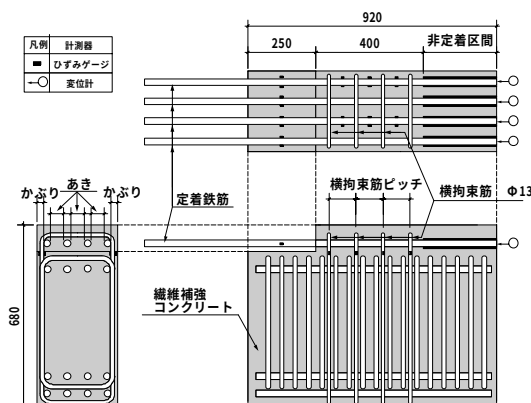


図 2 試験体および計測位置

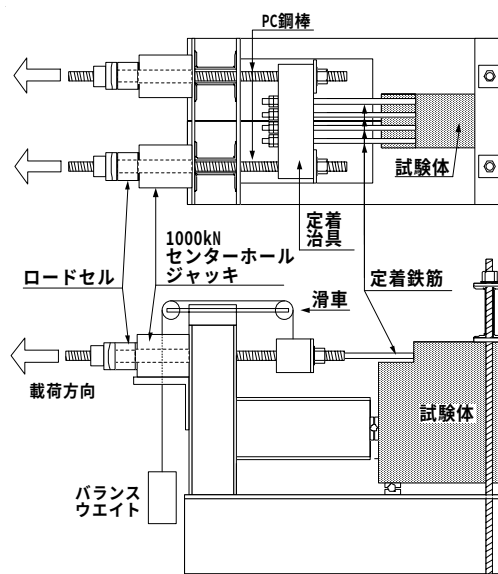


図 3 載荷装置

ここに、 l_d ：鉄筋の基本定着長

f_{syd} ：鉄筋の設計引張降伏強度

f_{bod} ：コンクリートの設計付着強度

$f_{bod}=f_{bok}/\gamma_c$ (γ_c :材料係数 1.3)

$f_{bok}=0.28f_{ck}^{2/3}$

(f_{ck} :コンクリートの圧縮強度の特性値)

ϕ ：定着する鉄筋の直径

$\alpha_b = (0.75/K_c) + 0.2$ ($0.5 \leq \alpha_b \leq 1.0$)

$K_c = (c_b/\phi) + \{15A_t/(s \cdot \phi)\}$

c_b ：定着する鉄筋のかぶり、定着する鉄筋の
あきの 1/2 のうち、小さい方の値

A_t ：仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄
筋の断面積

s ：横方向鉄筋の中心間隔

本式の中でコンクリートの付着強度は、コンクリートのかぶりや横方向鉄筋などによる影響について $1/\alpha_b$ で考慮されている、すなわち**式(2)**のように表すことができる。

$$f_{bod} \times \frac{1}{\alpha_b} = f_{bod} \times \frac{1}{\frac{0.75}{\frac{c_b}{\phi} + \frac{15A_t}{s \cdot \phi}} + 0.2} \quad (2)$$

本実験では、**式(2)**に短繊維の影響を加えることを意図し、パラメータを以下の 6 つに設定した。

- ・短繊維の体積混入率 p_f
- ・繊維の種類
- ・コンクリートの圧縮強度 f_c
- ・ α_b
- ・定着鉄筋の径 ϕ
- ・ c_b/ϕ

表 1 に試験体諸元を示す。また、各検討内容とそれに用いた試験体 No. を**表 2** に示す。なお、短繊維補強コンクリートの圧縮強度 f_c は、繊維を混入した後の圧縮強度を用いている。

2.3 使用材料

(1) 短繊維

使用した短繊維は、一般的に流通している短繊維のうち鋼繊維およびビニロン繊維を一種類ずつ（繊維 A および繊維 V）、また、既往の研究¹⁾において繊維補強効果が確認されている鋼繊維（繊維 B）の 3 種類を選定した。各短繊維の形状を**写真 2** に、短繊維の寸法および機械的性質を**表 3** に示す。

(2) 鉄筋

使用した鉄筋の径は、定着鉄筋については D25 又は D32、横方向鉄筋については D13 とした。材質は、定着鉄筋については実験において降伏させないことを意図して USD685 とし、横方向鉄筋については一般的な材質として SD345 とした。鉄筋の機械的性質を**表 4** に示す。なお、鉄筋の節形状はネジ節とした。

表 1 試験体諸元

試験体 No.	コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm ²)	繊維		定着鉄筋				横補強筋		α_b
		種類	体積混入率 p_f (%)	径 ϕ (mm)	かぶり又はあきの 1/2 c_b (mm)	定着長 l (mm)	c_b/ϕ	径 ϕ (mm)	ピッチ s (mm)	
0	25.2	—	0.0	25	25	400	1.00	13	100	0.74
1	28.7	A	0.5	25	25	400	1.00	13	100	0.74
2	26.5	A	0.75	25	25	400	1.00	13	100	0.74
3	20.9	A	1.0	25	25	400	1.00	13	100	0.74
4	28.4	B	0.5	25	25	400	1.00	13	100	0.74
5	33.8	B	1.0	25	25	400	1.00	13	100	0.74
6	27.5	V	0.5	25	25	400	1.00	13	100	0.74
7	25.9	V	1.0	25	25	400	1.00	13	100	0.74
8	48.3	A	0.5	25	25	400	1.00	13	100	0.74
9	62.4	A	0.5	25	25	400	1.00	13	100	0.74
10	25.0	A	0.5	25	43	400	1.72	13	50	0.50
11	22.8	A	1.0	25	43	400	1.72	13	50	0.50
12	29.4	—	0.0	32	32	400	1.00	13	100	0.78
13	27.9	A	0.5	32	32	400	1.00	13	100	0.78
14	21.7	A	1.0	32	32	400	1.00	13	100	0.78
15	28.7	A	0.5	25	19	400	0.76	13	100	0.86
16	27.9	A	0.5	25	30	400	1.20	13	100	0.67
17	25.0	A	0.5	25	37	400	1.48	13	100	0.60

表 2 検討内容と用いた試験体 No.

検討内容	水準	試験体 No.
繊維混入率による影響	0～1.0%	0,1,2,3
繊維の種類による影響	繊維 A 繊維 B 繊維 V	1,2,3(繊維 A) 4,5(繊維 B) 6,7(繊維 V)
コンクリート強度による影響	28.7～62.4	1,8,9
c_b/ϕ (鉄筋径およびあき・かぶり)による影響	0.76～1.48	1,13,15,16,17
α_b (c_b/ϕ および横方向鉄筋)による影響	0.5～0.86	0～3, 8～17



a) 繊維 A (鋼繊維) b) 繊維 B (鋼繊維) c) 繊維 V (ビニロン)

写真 2 使用した短繊維

表 3 短繊維の寸法および機械的性質

記号	繊維種別	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	規格引張強度 (N/mm ²)
A	鋼繊維	30	0.60	1,100
B		30	0.62	980
V	ビニロン繊維	30	0.66	880

表 4 鉄筋の機械的性質

材質	鉄筋径 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	使用部位
SD345	13	374	175,734	横方向鉄筋
USD685	25	711	183,573	定着鉄筋
	32	792	185,999	

(3) コンクリートの配合および短繊維混入方法

使用したコンクリートの配合を表 5 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材の最大寸法は 20mm とした。また、スランブは短繊維を混入しない試験体については 12cm±2.5cm とし、混入する試験体については 18cm±2.5cm 又は 21cm±2.5cm とした。これは、短繊維を混入することによるスランブロスを考慮したものである。

また、短繊維の混入方法は、現地に到着したトラックアジテータに短繊維を投入後、所定の時間ドラムを回転させる、すなわち実際に現場で行われている混入方法と同様とした。

2.4 実験結果

(1) 短繊維補強コンクリートのフレッシュ性状

本実験で使用したコンクリートのフレッシュ性状および実験時の圧縮強度を、短繊維混入前後それぞれについて表 6 に示す。これによれば、短繊維を混入することにより、空気量が増加する場合があり、空気量の増加が著

しいものについては、圧縮強度が低下する傾向がある。短繊維コンクリートを実施工に適用する際には、これらを踏まえた管理基準を設定する必要がある。

(2) 実験結果の評価方法

本実験は、4 本の鉄筋をまとめて引き抜いているため、厳密には各鉄筋が均等に引き抜けているわけではない。それは各鉄筋に貼り付けたひずみゲージの値からそれぞれの鉄筋に作用している力を算出することで確認できる。各鉄筋についてひずみ値から算出した荷重と鉄筋端部変位との関係のうち、代表的なものを図 4 に示す。これによれば、各鉄筋に作用する力には、載荷過程においては若干のばらつきはあるものの、終局時には各鉄筋がほぼ均等に力を負担していることがわかる。本実験は複数鉄筋からなる柱部材の定着性能を評価することを目的としていることから、実験結果の整理においては、これらのばらつきも含めて評価すると考え、引き抜く鉄筋 4 本の平均付着強度を用いることとした。すなわち、計測された荷重の合計を鉄筋 4 本の付着面積で除した式(3)により

表 5 使用したコンクリートの配合

試験体 No.	粗骨材 最大寸法 G _{max} (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
						水 W	セメント C	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	細骨材 3 S3	粗骨材 GL	混和剤 1	混和剤 2
0,12	20	12	4.5	60.9	47.2	168	276	303	432	130	982	2.76	—
2	20	18	4.5	60.9	48.7	185	304	301	429	129	918	3.04	
3,11,14	20	21	4.5	60.9	49.9	194	319	302	431	129	878	3.19	
1,4,5,6, 7,10,13, 15,16,17	20	21	4.5	56.8	49.4	194	342	295	422	127	878	3.42	—
8	20	21	4.5	42.0	48.0	179	426	281	402	121	886	—	4.69
9	20	21	4.5	33.2	42.9	179	539	238	339	102	918	—	6.47

細骨材1:熊谷市産砂
細骨材2:秩父郡皆野町産砕砂
細骨材3:千葉県佐原市産砂
粗骨材:秩父郡皆野町産砕石

混和剤1:AE減水剤標準型Ⅰ種
混和剤2:高性能AE減水剤標準型Ⅰ種
セメント:早強ポルトランドセメント

表 6 コンクリートのフレッシュ性状および

試験体 No.	フレッシュ時の性状						硬化時の性状(載荷試験時)			
	気温 (°C)	コンクリート 温度 (°C)	スランブ(cm)		空気量(%)		材齢 (日)	コンクリート 設計強度 (N/mm ²)	ベースコンクリート 強度 (N/mm ²) ①	繊維コンクリート 強度 (N/mm ²) ②
			繊維 混入前	繊維 混入後	繊維 混入前	繊維 混入後				
0	18	21	11.5	—	3.3	—	8	24	25.2	—
1	9	11	20.5	16.5	4.5	5.9	12	24	28.5	28.7
2	13	17	18.5	10.0	5.5	6.0	15	24	24.5	26.5
3	14	16	22.0	15.0	4.3	9.1	13	24	24.2	20.9
4	11	11	19.0	13.5	4.8	4.6	13	24	27.9	28.4
5	11	12	20.0	11.0	4.8	4.5	13	24	25.8	33.8
6	14	12	21.0	16.0	4.9	5.0	18	24	27.1	27.5
7	14	14	19.5	11.5	3.8	3.8	15	24	24.1	25.9
8	9.5	13	20.5	19.0	3.5	4.7	18	36	51.1	48.3
9	15	16	21.0	20.5	3.9	5.7	15	48	67.4	62.4
10	9	11	20.5	16.5	4.5	5.9	9	24	25.8	25.0
11	14	16	22.0	15.0	4.3	9.1	15	24	26.1	22.8
12	12	16	18.5	—	3.3	—	10	24	29.4	—
13	9	11	20.5	16.5	4.5	5.9	13	24	28.0	27.9
14	14	16	22.0	15.0	4.3	9.1	14	24	25.1	21.7
15	9	11	20.5	16.5	4.5	5.9	12	24	28.5	28.7
16	9	11	20.5	16.5	4.5	5.9	13	24	28.0	27.9
17	9	11	20.5	16.5	4.5	5.9	9	24	25.8	25.0

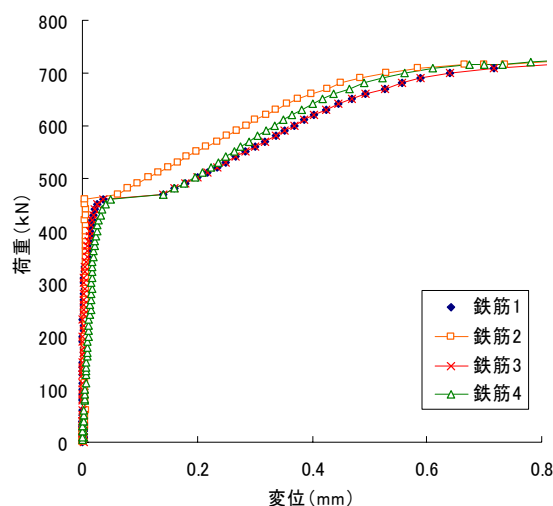


図4 荷重－鉄筋端部変位関係

求めた平均付着強度を用いることとした。

$$\text{平均付着応力 } \tau : \tau = \frac{P}{\Phi \pi \times l \times 4} \quad (3)$$

ここに、

P : 2つのロードセルにより計測した値の合計

Φ : 定着鉄筋径

l : 定着長

(2) 実験結果一覧

実験の結果得られた、ひび割れ発生荷重および最大荷重、また、これらの値からそれぞれ式(3)により算出した平均付着応力の一覧を表7に示す。ここで、ひび割れ発生時の平均付着応力の決定方法については4.2において述べることとする。

(3) コンクリート強度の影響

前述した文献2), 4)によれば、コンクリートの付着強度は圧縮強度の2/3乗に比例することが示されている。短繊維補強コンクリートについても同様なことが成り立つことを確認するために、短繊維の体積混入率を0.5%で一定とし、コンクリート強度をパラメータとした試験体No.1, 8, 9について、最大平均付着応力 τ_u とコンクリート強度の2/3乗の関係を図5に示す。これによれば、 τ_u とコンクリート強度の2/3乗の間には強い相関関係が見られ、両者は比例関係にあることが確認できる。この結果を踏まえ、以下の検討においてはコンクリート強度の差異による影響を考慮する為、平均付着応力 τ を f_{bok} で除して無次元化した値で整理を行うこととする。

(4) 平均付着応力－鉄筋端部変位関係

τ/f_{bok} と鉄筋端部変位の関係のうち、短繊維Aを用いた場合の代表的なものを図6に示す。No.0は短繊維を混

入していないもの、No.1は短繊維を体積混入率で0.5%混入したもの、No.3は同じく短繊維を1.0%混入したものである。これによれば、短繊維の混入率の増加とともに平均付着応力が増加する傾向にあることが確認できる。

表7 実験結果一覧

No.	載荷試験結果				備考
	ひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	最大荷重 P_u (kN)	ひび割れ発生時 付着応力 τ_{cr} (N/mm ²)	最大 付着応力 τ_u (N/mm ²)	
0	299.46	434.00	2.38	3.45	繊維混入率 による影響
1	379.66	559.50	3.02	4.45	
2	350.55	531.70	2.79	4.23	
3	351.20	560.10	2.79	4.46	
4	390.66	554.30	3.11	4.41	繊維の種類 による影響
5	430.76	623.50	3.43	4.96	
6	309.80	467.63	2.47	3.72	
7	289.76	432.70	2.31	3.44	
8	460.51	725.05	3.66	5.77	f_c' による影響
9	640.32	902.92	5.10	7.19	
10	599.58	743.20	4.77	5.91	α_b 下限値
11	592.46	818.20	4.71	6.51	
12	470.22	579.50	2.92	3.60	鉄筋径 による影響
13	481.86	699.20	3.00	4.35	
14	460.51	649.40	2.86	4.04	
15	341.50	593.80	2.72	4.73	あき・かぶり による影響
16	441.11	628.70	3.51	5.00	
17	490.92	591.80	3.91	4.71	

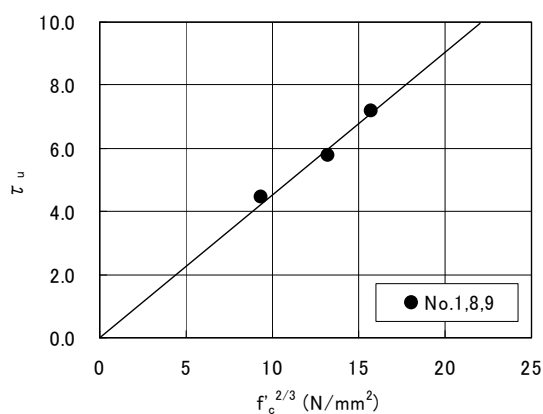


図5 $\tau_u - f_c'^{2/3}$ 関係

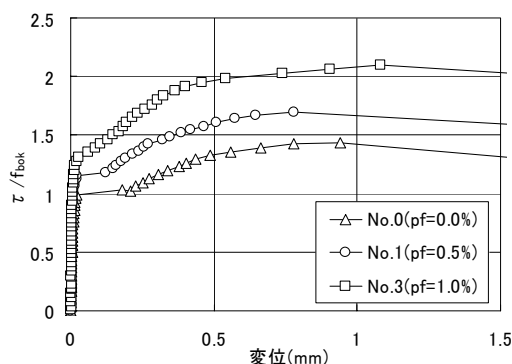


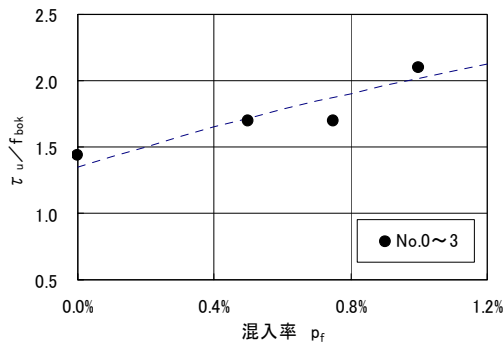
図6 τ_u －鉄筋端部変位関係

(5) 短繊維体積混入率の影響

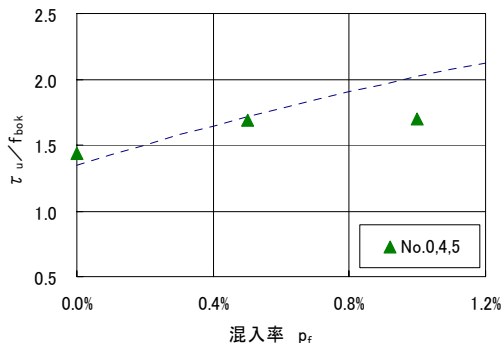
短繊維の体積混入率 p_f をパラメータとした試験体について、最大平均付着応力 τ_u を f_{bok} で除した値 τ_u/f_{bok} と短繊維の体積混入率 p_f の関係を、使用した短繊維の種類毎に図 7(a)~(c)に示す。

繊維 A（鋼繊維）を用いた場合である図 7(a)では、 p_f の増加に伴い τ_u/f_{bok} も増加する傾向にあることがわかる。なお、図中の点線は、4.4 の式(6)による計算値を示したものであり、これは本実験の結果を踏まえて提案している短繊維補強効果を考慮した付着強度算定式である。

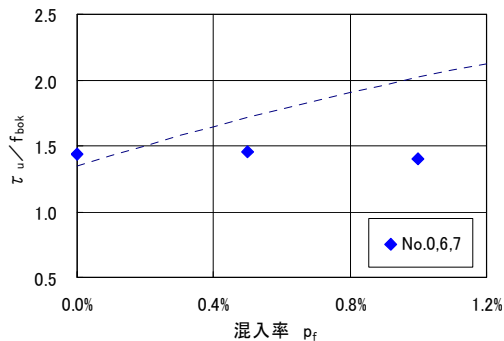
繊維 B（鋼繊維）を用いた場合である図 7(b)では、繊維を混入しない場合に対して $p_f=0.5\%$ の場合の方が τ_u/f_{bok} は増加しているが、 $p_f=1.0\%$ の場合は $p_f=0.5\%$ の時と同程度であった。これより、繊維 A に対し、同じ鋼繊維であっても、その種類によっては、混入率の増加による付着強度の増加に頭打ちが生じる場合があると考えられる。



(a) 繊維 A（鋼繊維）の場合



(b) 繊維 B（鋼繊維）の場合



(c) 繊維 V（ビニロン繊維）の場合

図 7 $\tau_u/f_{bok} - p_f$ 関係

繊維 V（ビニロン繊維）を用いた場合である図 7(c)では、短繊維混入の有無に関わらず、 τ_u/f_{bok} は同程度であった。これより、本実験で使用したビニロン繊維については、短繊維体積混入率 0.0~1.0%の範囲において、付着強度を増加させる効果はないと考えられる。

(6) c_b/ϕ の影響

短繊維を混入していない一般的なコンクリートにおいては、付着強度に対する鉄筋のかぶりやあきの影響は式(2)の中で c_b/ϕ の形で考慮されている。そこで、短繊維 A を体積混入率で 0.5%混入した場合において、 c_b/ϕ をパラメータとした試験体 No.1,13,15~17 について、 τ_u/f_{bok} と c_b/ϕ の関係を図 8 に示す。これによれば、 c_b/ϕ の増加に伴い、緩やかではあるが、 τ_u/f_{bok} は増加する傾向にあると考えられる。なお、図中の点線は、図 7 同様、4.4 の式(6)による計算値を示したものである。

(7) α_b の影響

短繊維を混入していない一般的なコンクリートにおいては、付着強度に対する横方向鉄筋の影響を式(2)の中で $15A_t/s\phi$ の形で考慮している。また、短繊維が鉄筋の付着性能を向上させる効果は、定着鉄筋だけでなく、横方向鉄筋についても作用すると考えられる。そこで、 $(A_t/s\phi) \cdot p_f$ と τ_u/f_{bok} の関係を図 9 に示す。これによれば、 $(A_t/s\phi) \cdot p_f$ が増加するにつれて τ_u/f_{bok} も増加する傾向があることが確認できる。

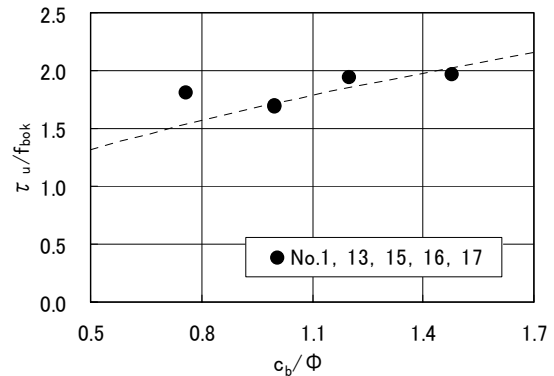


図 8 $\tau_u/f_{bok} - c_b/\phi$ 関係

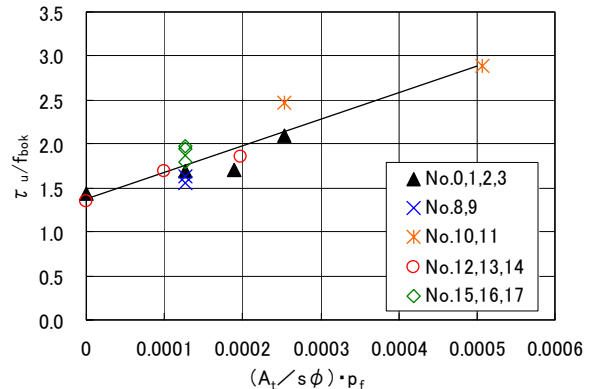


図 9 $\tau_u/f_{bok} - (A_t/s\phi) \cdot p_f$ 関係

3. 短繊維による補強メカニズムの検討

短繊維による補強効果が比較的顕著に認められた短繊維 A の実験結果を用いて、その補強メカニズムを検討した。短繊維を混入していない試験体 No.0 と短繊維 A を 1.0%混入した No.3 について、 τ/f_{bok} と鉄筋端部変位の関係を図 10 に示す。

No.0 では、荷重初期段階（O 点～A 点）においては τ/f_{bok} と鉄筋端部変位は直線的な関係を示すが、図中の A 点においてコンクリートにひび割れが発生し、変位が急激に増加する。その後 B 点を境に付着応力も増加し、終局に至る。B 点においては横方向鉄筋が抵抗し始めると考えられる。一方、繊維を混入した No.3 の場合は、No.0 に対して A 点の付着強度が増加する（A'点）。この増加分を効果 I とする。この増加分だけ No.0 の A 点以降の曲線を平行移動させたものを図中に点線で示すと、No.3 の曲線はこの点線をさらに上回っていることがわかる。この増加分を効果 II とする。ここでは、効果 I の増加分は繊維自体が割裂ひび割れの形成を抑制する、すなわち架橋効果による付着強度増加分であると考えられる。また、効果 II の増加分は、繊維が横方向鉄筋の付着を向上させることによる付着強度増加分であると考えられる。

4. 短繊維による補強効果の定式化の検討

4.1 補強効果を考慮した式の設定

基本定着長の算定式の中でコンクリートの付着強度は、コンクリートのかぶりや横方向鉄筋などによる影響を考慮して式(2)のように表すことができることを先に述べた。本研究では、式(2)に 3 で述べた短繊維による 2 つの付着強度向上効果を盛り込むと、式(4)のような形で表すことができると考えた。

$$f_{bod} \times \left\{ \left(\frac{1}{\frac{0.75}{\frac{c_b}{\phi} + \frac{15A_t}{s \cdot \phi} (1+k_2 p_f)} + 0.2} \right) + k_1 \frac{c_b}{\phi} p_f \right\} \quad (4)$$

ここで、係数 k_1 が含まれる項は、先に述べた架橋効果（効果 I）による付着強度増加分を表しており、図 7 および図 8 において c_b/ϕ と p_f が付着強度の増加に関係していることが確認されたことからこのように設定した。また、係数 k_2 が含まれる項は、繊維が横方向鉄筋の付着を向上させることによる付着強度増加分（効果 II）を表しており、図 9 において付着強度と $(A_t/s\phi) \cdot p_f$ の間に相関関係が見られたことからこのように設定した。

4.2 架橋効果(効果 I)による付着強度増加分の検討

架橋効果（効果 I）による付着強度増加分を検討するため、試験体にひび割れが発生した時の平均付着応力 τ_{cr} を用いた。ここで試験体にひび割れが発生した時の平均付着応力の決定方法は、ひび割れが発生することにより

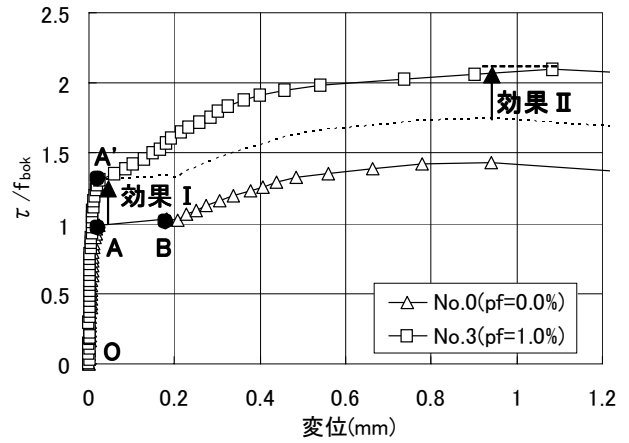


図 10 τ/f_{bok} －鉄筋端部変位関係

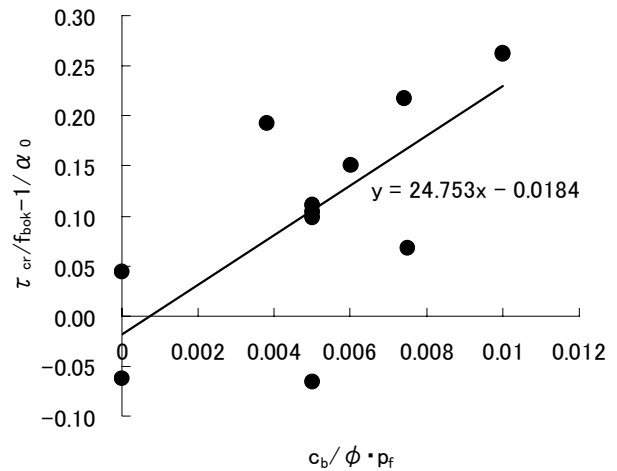


図 11 $\tau_{cr}/f_{bok} - 1/\alpha_0$ 関係

鉄筋端部変位が急激に増加することを利用し、その直前の値、すなわち図 10 の A 点や A'点をひび割れ発生応力と定めた。横方向鉄筋が無い場合の α_b を α_0 とすれば、図 10 における効果 I の増分は、式(5)で表される。

$$\frac{\tau_{cr}}{f_{bok}} - \frac{1}{\alpha_0} \quad (5)$$

ここで、式(5)で表される付着強度の増加分と $c_b/\phi \cdot p_f$ との関係を図 11 に示す。これによれば、 $c_b/\phi \cdot p_f$ が大きくなる程 $\tau_{cr}/f_{bok} - 1/\alpha_0$ も増加する傾向を示し、線形近似させると原点付近を通る直線になることがわかる。従って式(4)中の係数 k_1 を今回帰式の傾きである 24.75 と設定した。

4.3 横拘束筋の付着が向上すること(効果 II)による付着強度増加分の検討

前項の k_1 を考慮し、式(4)による付着強度の計算値 τ_{cal} と実験で得られた最大付着応力 τ_u の差が最も小さくなるように k_2 を求めると、 $k_2=174$ となる。これにより求めた式(4)による τ_{cal} と実験値 τ_u との関係を図 12 に示す。

4.4 基本定着長の式の提案

式(4)を鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾の基本定着長算定式の形式(式(2)の形式)に合わせて近似して変形すると、付着強度の特性値は式(6)の形で表すことができる。

$$\tau_{cal} = f_{bok} \times \left(\frac{1}{\frac{0.75}{\frac{c_b}{\phi} (1 + k_3 p_f) + \frac{15A_t}{s \cdot \phi} (1 + 174 p_f)} + 0.2} \right) \quad (6)$$

式(6)から求まる付着強度 τ_{cal} と実験で得られた最大付着応力 τ_u の差が最も小さくなるように k_3 を定めると、 $k_3 = 50$ となる。本式による $\tau_{cal} - \tau_u$ 関係を図13に示す。

以上より、短繊維混入効果を考慮した基本定着長の算定式を式(7)のように設定した。

$$l_d = \alpha_b \cdot \frac{f_{syd}}{4f_{bod}} \cdot \phi \geq 20\phi \quad (7)$$

ここに、 l_d ：鉄筋の基本定着長

f_{syd} ：鉄筋の設計引張降伏強度

f_{bod} ：コンクリートの設計付着強度

ϕ ：定着する鉄筋の直径

$\alpha_b = (0.75/K_c) + 0.2$

ただし、 $0.4 \leq \alpha_b \leq 1.0$

$K_c = (c_b/\phi) \cdot (1 + 50p_f) + \{15A_t/(s \cdot \phi)\} \cdot (1 + 174p_f)$

c_b ：定着する鉄筋のかぶり、定着する鉄筋のあきの1/2のうち、小さい方の値

A_t ：仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積

s ：横方向鉄筋の中心間隔

p_f ：短繊維体積混入率 ($0 \leq p_f \leq 0.01$)

ここで、 α_b の下限値を0.4に拡張してある。これは、本実験の範囲で確認された α_b の下限値が0.4であったためである。また、本設計式を導くにあたり、短繊維補強コンクリートの圧縮強度の特性値 f'_c は、繊維混入後の圧縮強度を用いたことから、短繊維補強コンクリートを用いる場合は、繊維混入後の強度が設計基準強度を満たしている必要があると考えている。また、式(6)において f_{bok} の代わりに f_{bod} を用いた場合の τ_{cal} と実験値 τ_u の関係を図13内に点線で示した。これより、実験で得られた値はすべて安全側にあることが確認できる。

5. 提案式の効果の確認

実在する一般的な鉄道RCラーメン高架橋の部材接合部について、本研究の提案式による定着長の低減効果を試算した。試算した構造物の諸元および計算結果を表8に、構造物の概要を図14に示す。これによれば、短繊維を体積混入率で1.0%混入させたコンクリートを用いた場

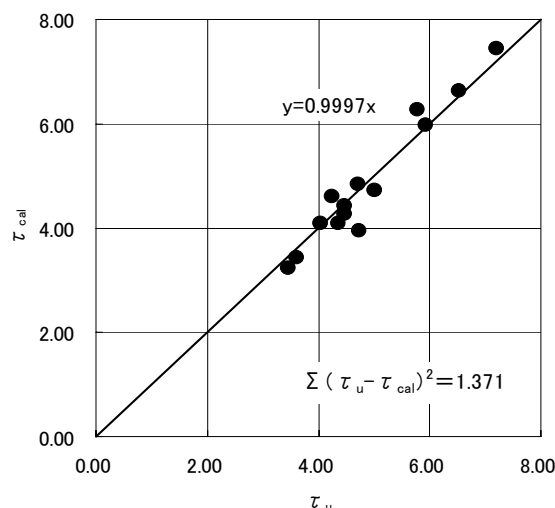


図12 $\tau_{cal} - \tau_u$ 関係 (式(4)による)

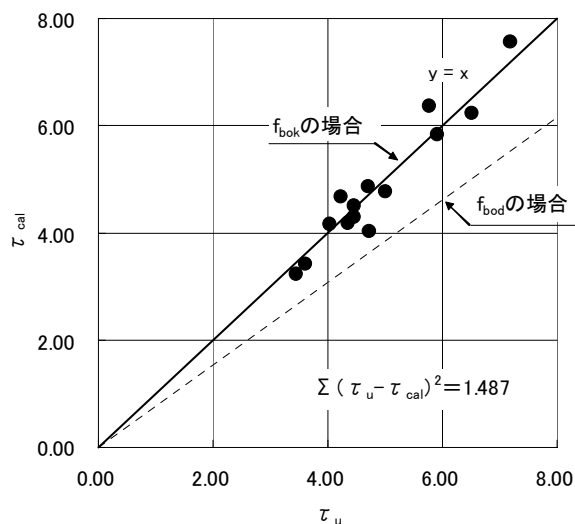


図13 $\tau_{cal} - \tau_u$ 関係 (式(6)による)

表8 試算に用いた構造物諸元および計算結果

構造物諸元	コンクリート	強度	27.0 N/mm ²
	主鉄筋	公称直径 ϕ	38.1 mm
		規格降伏強度 f_{syd}	390 N/mm ²
		かぶり	276.3 mm
		水平あき	70.0 mm
	帯鉄筋	公称直径	22.2 mm
		公称断面積 A_0	387.1 mm ²
		配筋ピッチS	200.0 mm
	補強鉄筋	公称直径	15.9 mm
		公称断面積 A'_0	198.6 mm ²
		配筋ピッチS'	261.2 mm
計算結果	繊維	体積混入率	1.0 %
	杭	径	1200 mm
		現在の算定式	1490 mm
		提案式	1100 mm

合、従来設計における定着長を 10φ 程度減じることが可能であることが確認できた。一般的には設計上、半円形フックをつけることにより定着長を 10φ 減じることができることとされていることから、本効果はフックを不要とすることができる程度の効果と考えられる。しかし、既往の研究¹⁾によれば、フックをだけでなく、帯鉄筋も省略した場合の安全性が実験的に確認されており、鉄道 RC ラーメン高架橋の部材接合部においては未だ設計に反映されていない短繊維補強効果が存在すると考えられる。

6. まとめと今後の課題

鉄道 RC ラーメン高架橋における柱・地中梁・杭の接合部の配筋を短繊維補強コンクリートにより合理化することを目的として、短繊維による補強効果の定量的な把握を意図した鉄筋の引き抜き実験を行い、短繊維による補強効果を考慮した鉄筋の基本定着長の算定式を提案した。

実構造物に本提案式を適用した場合の試算を行ったところ、鉄筋の半円形フックを不要にできる程度の効果が確認できたが、既往の研究結果を考慮すると、未だ設計に反映されていない短繊維補強効果が存在すると考えられる。今後は、部材接合部の設計方法および破壊メカニズムをより詳細に検討し、短繊維補強コンクリートの効果が十分に設計法に反映されるよう検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 山田尚義, 近藤眞生, 柏原茂, 谷村幸裕: 鋼繊維補強コンクリートを用いたラーメン高架橋部材接合部の主筋定着方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.853-858, 2001
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, pp.239-242, 2004.4

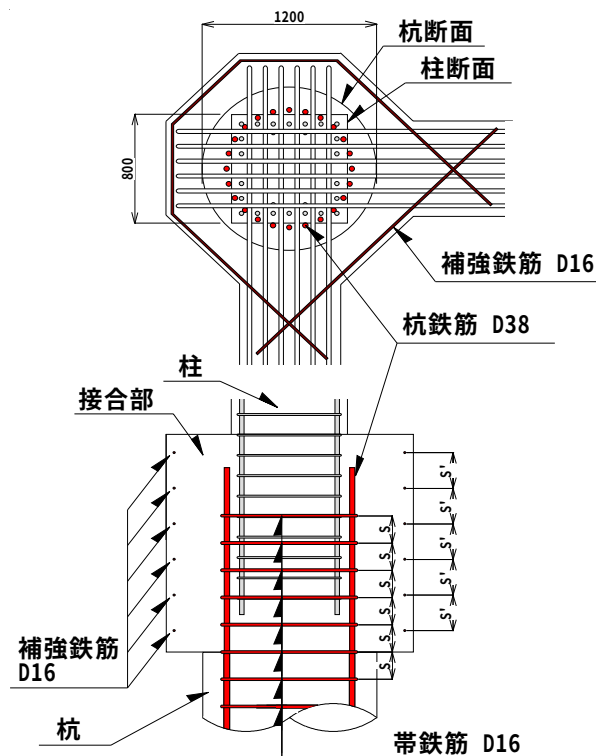


図 14 試算に用いた構造物の概要

- 3) 藤井栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究—第 1 報 付着割裂破壊を支配する要因についての実験結果—, 日本建築学会論文報告集, 第 319 号, 1982
- 4) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.21, pp.136-137, 2002
(社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造物編, 178-184, 2002